

소기후모형과 전자기후도를 기반으로 한 지리공간 도식의 과거, 현재 그리고 미래

김대준*

(재)국가농림기상센터

(2021년 11월 26일 접수; 2021년 12월 28일 수정; 2021년 12월 30일 수락)

Past, Present and Future of Geospatial Scheme based on Topo-Climatic Model and Digital Climate Map

Dae-Jun Kim*

National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

(Received November 26, 2021; Revised December 28, 2021; Accepted December 30, 2021)

ABSTRACT

The geospatial schemes based on topo-climatology have been developed to produce digital climate maps at a site-specific scale. Their development processes are reviewed here to derive the needs for new schemes in the future. Agricultural and forestry villages in Korea are characterized by complexity and diversity in topography, which results in considerably large spatial variations in weather and climate over a small area. Hence, the data collected at a mesoscale through the Automated Synoptic Observing System (ASOS) operated by the Korea Meteorological Administration (KMA) are of limited use. The geospatial schemes have been developed to estimate climate conditions at a local scale, e.g., 30 m, lowering the barriers to deal with the processes associated with production in agricultural and forestry industries. Rapid enhancement of computing technologies allows for near real-time production of climate information at a high-resolution even in small catchment areas and the application to future climate change scenarios. Recent establishment of the early warning service for agricultural weather disasters can provide growth progress and disaster forecasts for cultivated crops on a farm basis. The early warning system is being expanded worldwide, requiring further advancement in geospatial schemes and digital climate mapping.

Key words: Small-scale climate, Digital climate map, Agro-meteorology, Farm-Specific, Early Warning Service

I. 서 언

소기후(small scale climate)는 규모가 작은 기후, 즉, 국지기후(local climate)와 미기후(micro-climate)의 의미를 모두 포함하는 상대적으로 작은 규모를 의

미한다. 소기후보다 큰 공간 규모를 가진 중규모 기후는 기상청의 종관기상관측망(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 수준의 규모에 해당하는 것으로 해석할 수 있다. 기상자료 수집을 고려하여 규모를 정의할 경우, 기상청이 종관기상관측망을 통해



* Corresponding Author : Dae-Jun Kim
(djkim@ncam.kr)

수집하는 기후 범위 보다 작은 규모의 기후를 소기후로 분류할 수 있다(Yun, 2004; Kim *et al.*, 2019).

식물들이 자라고 있는 지표면은 근락 내부의 독특한 미기후를 생성하며, 국지적인 기후를 만들어 낸다. 또한, 산, 언덕 등 서로 다른 경관에 의한 에너지 및 물질 수지의 시공간적 변이를 통해 각각의 국지적 기후, 즉 소기후를 형성한다. 우리나라는 일부 평야지대도 있지만 산지가 대부분으로 이루어져 있는 복잡하고 다양한 지형의 분포를 가지고 있으며, 대체로 경사지, 언덕, 또는 이들이 둘러싸고 있는 소규모의 집약적 형태의 농산촌을 이루고 있다. 이러한 지형 형태는 좁은 집수역 내에서도 다양한 분포의 기후환경을 만들어 낼 수 있다(Yun, 2010). 여러 산업분야 가운데에서도 농림업은 특히 기상 환경에 매우 민감한 분야로서, 중규모 이상의 기후조건으로는 국지적인 우리나라 농림업에 이용되는 지형 환경을 반영하기는 어렵다. Yun (2007)은 우리나라와 같이 복잡다양한 지형분포에 소기후를 추정할 수 있는 모형의 필요성을 제시하였다.

소기후 모형은 농림업 생산활동이 이루어지고 있는 소규모 지역에서 다양한 기상, 기후 정보를 생산하기

위하여 개발되고 발전되어 왔다. 소기후모형은 주간 기온, 야간 기온, 강수량, 일사량, 등 주요 기상 정보들에 주변 지형, 식생 등이 미치는 영향을 정량화하고, 중규모의 기후 환경으로 나타낼 수 없는 작은 규모의 기후 정보를 만들어낸다. 한편, 소기후모형은 GIS와 컴퓨팅 기술을 활용하여 전자기후도(Digital Climate Map)라는 형태로 구현된다. 특히, 과거의 전자기후도는 단순한 방식 및 작은 지역에 한정하여 제작되었지만, 최근 전산처리 속도의 향상으로 실시간 기상자료를 처리하는 수준까지 발전하였다. Kim *et al.*(2019)은 소기후모형과 전자기후도의 발전에 관해 논한 바 있으며, 본 총설에서는 현재까지 개발된 기술들에 대해 다시 한 번 조망하고 미래의 발전방안을 제시하고자 한다.

II. 소기후모형의 개발과 전자기후도 제작

기상요소의 시공간적인 특성을 알기 위해서는 면적 단위의 기상정보가 필요하다. 기존의 기상관측망에서 얻을 수 있는 관측 정보는 주로 점(point) 단위로, 농림업에서 이를 활용하기에는 제한적일 수밖에 없다. 해

Table 1. List of Papers related to construction of ‘geospatial scheme based on topo-climatology’ and ‘digital climate map’

Author	Year	Title
Yun <i>et al.</i>	2000	A Spatial Interpolation Model for Daily Minimum Temperature over Mountainous Regions
Yoon <i>et al.</i>	2000	Air Temperature Profile within a Partially Developed Paddy Rice Canopy
Yun <i>et al.</i>	2001	Seasonal Trend of Elevation Effect on Daily Air Temperature in Korea
Yoon and Yun	2001	Using Synoptic Data to Predict Air Temperature within Rice Canopies across Geographic Areas
Hwang <i>et al.</i>	2001	Characteristics of Nocturnal Cooling at a Pear Orchard in Frost-Prone Area
Chung and Yun	2002	Spatial Interpolation of Hourly Air Temperature over Sloping Surfaces Based on a Solar Irradiance Correction
Chung <i>et al.</i>	2002	Minimum Temperature Mapping in Complex Terrain Considering Cold Air Drainage
Choi and Yun	2002	Implementing the Urban Effect in an Interpolation Scheme for Monthly Normals of Daily Minimum Temperature
Chung <i>et al.</i>	2003	Air Temperature Variation Affected by Site Elevation in Hilly Orchards
Chung <i>et al.</i>	2003	Relationship between Exposure Index and Overheating Index in Complex Terrain
Chung <i>et al.</i>	2003	An Optimum Scale for Topoclimatic Interpolation of Daily Minimum Temperature in Complex Terrain
Kim <i>et al.</i>	2004	Development and Use of Digital Climate Models in Northern Gyunggi Province - I. Derivation of DCMs from Historical Climate Data and Local Land Surface Features
Yun <i>et al.</i>	2004	Using Spatial Data and Land Surface Modeling to Monitor Evapotranspiration across Geographic Areas in South Korea

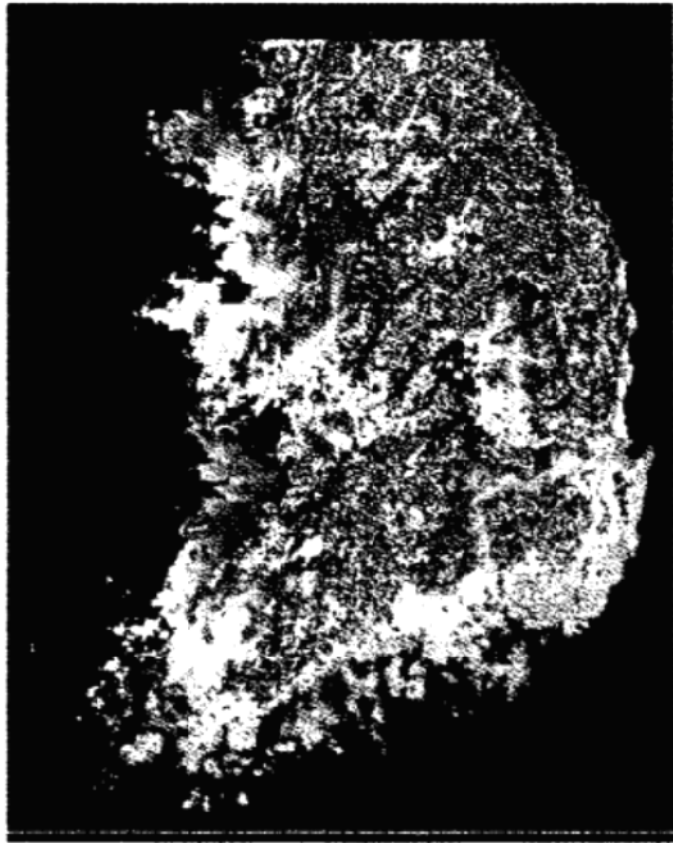


Fig. 1. Example of monthly mean temperature distribution map presented by NIMS (1992).

Table 2. List of papers related to production of digital climate map in South Korea

Author	Year	Title
Yun	2007	Applications of “High Definition Digital Climate Maps” in Restructuring of Korean Agriculture
Chung	2007	Performance of Northern Exposure Index in Reducing Estimation Error for Daily Maximum Temperature over a Rugged Terrain
Seo <i>et al.</i>	2008	Azimuthal Distribution of Daily Maximum Temperatures Observed at Sideslopes of a Grass-covered Inactive Parasitic Volcano (“Ohreum”) in Jeju Island
Yun	2009	A Simple Method Using a Topography Correction Coefficient for Estimating Daily Distribution of Solar Irradiance in Complex Terrain
Kim <i>et al.</i>	2009	Quantification of Temperature Effects on Flowering Date Determination in Niitaka Pear
Chung <i>et al.</i>	2009	The PRISM-based Rainfall Mapping at an Enhanced Grid Cell Resolution in Complex Terrain
Choi and Yun	2009	On Recent Variations in Solar Radiation and Daily Maximum Temperature in Summer
Yun	2010	Agroclimatic Maps Augmented by a GIS Technology
Kim and Yun	2010	A Quantification Method for the Cold Pool Effect on Nocturnal Temperature in a Closed Catchment
Kim <i>et al.</i>	2010	A Geospatial Evaluation of Potential Sea Effects on Observed Air Temperature
Choi <i>et al.</i>	2010	Performance of Angstrom-Prescott Coefficients under Different Time Scales in Estimating Daily Solar Radiation in South Korea

외에서는 일찍이 이러한 점 단위의 기상관측정보에 공간 개념(공간 내삽)을 적용함으로써 면적 단위로 변환하는 연구가 진행되어 왔다(Daly *et al.*, 1994; Hungerford *et al.*, 1989; Okamura, 1987; Regniere *et al.*, 1995).

우리나라에서는 제주도에 설치된 무인기상관측망 자료에 공간통계기법을 적용하여 월별 강수량 분포도를 1km 해상도로 상세화 한 것을 시작으로 평년 자료에 대해 면적 기상정보를 제작하기 시작하였다(Fig. 1)

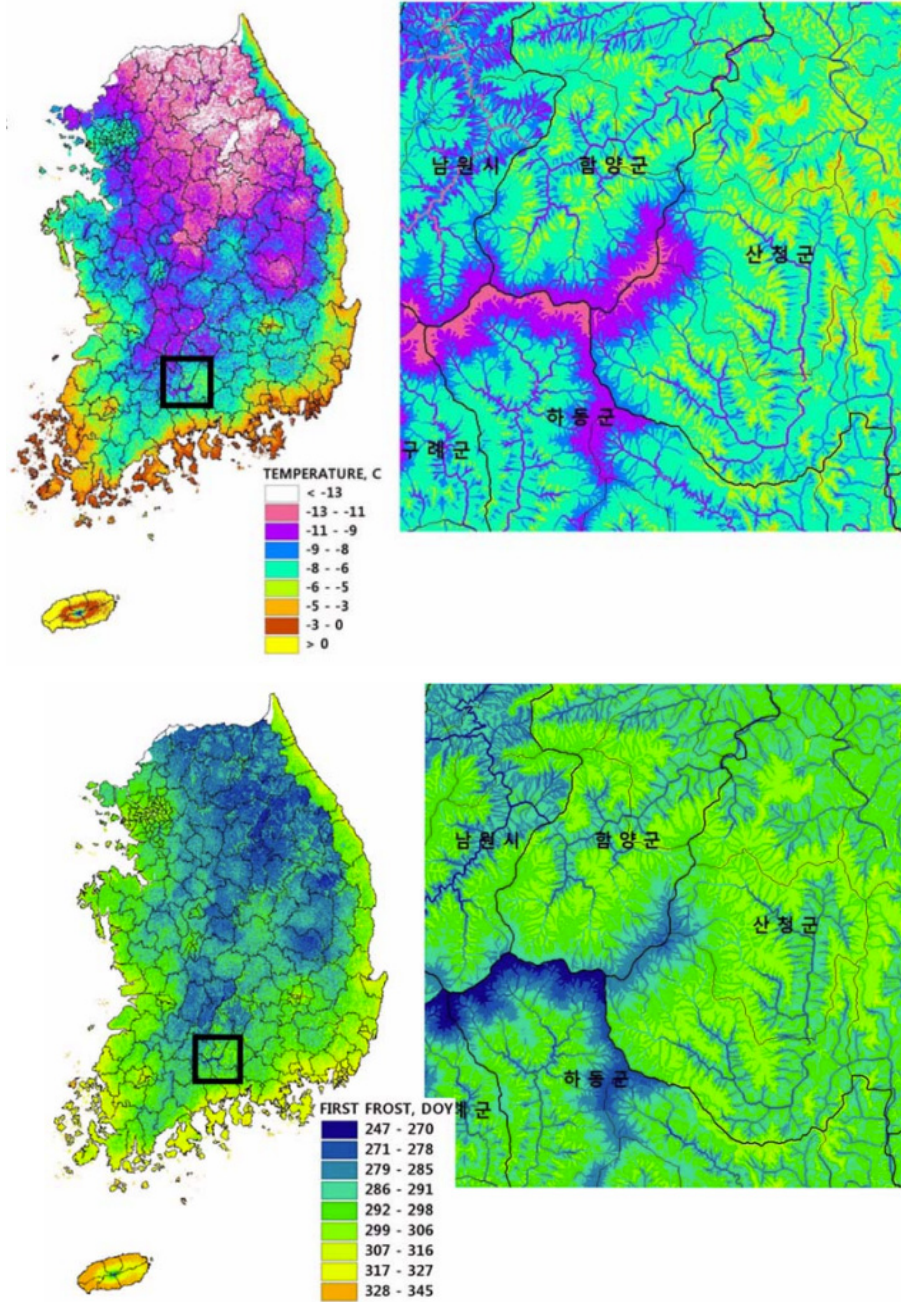


Fig. 2. Example of daily minimum temperature distribution map (top) and estimated dates for the first frost observation (bottom) presented by Yun(2010).

(Yun *et al.*, 1989; NIMS, 1992). 기본적으로 해외 사례와 같이 관측자료를 이용하여 공간 내삽을 통해 면적범위로의 제작이 선행적으로 이루어졌으며(Yun *et al.*, 2000; Yun and Cho, 2001), 이후 기온에 야간 냉기 침강효과, 일사수광량효과 등을 반영하기 시작하였다(Chung *et al.*, 2002; Chung and Yun, 2002).

이처럼 점 단위의 기상정보를 면적 단위로 추정할 수 있는 제작 기술은 소규모의 집수역을 연구대상지역으로 발전했고, 2006년 ‘전자기후도 기반 유역 단위

농업기상 예보시스템’ 사업을 통해 크게 성장하게 되었다. 공간정보기술과 소기후 추정 기술은 해상도 30m 수준까지 발전되었으며, 이를 이용하여 전국 840개의 표준유역단위로 기후도를 제작 후 전국 규모로 합쳐 최종적으로 평년 단위(1981-2010)의 월별 기후분포도가 제작되었다(Fig. 2). 최고기온에는 고도와 일사량, 그리고 도시열섬효과가, 최저기온에는 기온역전현상과 냉기집적효과를, 일사량에는 수평면일사량에 경사향 보정계수를 적용하며, 마지막으로 강수량은 경

Table 3. List of papers related to production of digital climate map in North Korea

Author	Year	Title
Yun	2000	Estimation of Climatological Precipitation of North Korea by Using a Spatial Interpolation Scheme
Kim and Yun	2011	Zoning Hydrologic Units for Geospatial Climatology in North Korea
Kim and Yun	2011	Mapping Monthly Temperature Normals Across North Korea at a Landscape Scale
Kim and Yun	2011	Estimation of Monthly Precipitation in North Korea Using PRISM and Digital Elevation Model
Choi and Yun	2011	A Sub-grid Scale Estimation of Solar Irradiance in North Korea
Kim and Kim	2019	Estimating the Monthly Precipitation Distribution of North Korea Using the PRISM Model and Enhanced Detailed Terrain Information

Table 4. List of papers on production of digital climate map using climate change scenarios

Author	Year	Title
Kim <i>et al.</i>	2009	The Suitable Region and Site for ‘Fuji’ Apple Under the Projected Climate in South Korea
Chung <i>et al.</i>	2009	Geospatial Assessment of Frost and Freeze Risk in ‘Changhowon Hwangdo’ Peach (<i>Prunus persica</i>) Trees as Affected by the Projected Winter Warming in South Korea: I. Determination of Freezing Temperatures
Kim <i>et al.</i>	2009	Geospatial Assessment of Frost and Freeze Risk in ‘Changhowon Hwangdo’ Peach (<i>Prunus persica</i>) Trees as Affected by the Projected Winter Warming in South Korea: II. Freezing Risk Index Based on Dormancy Depth as a Proxy for Physiological Tolerance to Freezing Temperature
Chung <i>et al.</i>	2009	Geospatial Assessment of Frost and Freeze Risk in ‘Changhowon Hwangdo’ Peach (<i>Prunus persica</i>) Trees as Affected by the Projected Winter Warming in South Korea: III. Identifying Freeze Risk Zones in the Future Using High-Definition Climate Scenarios
Kim <i>et al.</i>	2012	Freeze Risk Assessment for Three Major Peach Growing Areas under the Future Climate Projected by RCP8.5 Emission Scenario
Kim <i>et al.</i>	2012	An Outlook on Cereal Grains Production in South Korea Based on Crop Growth Simulation under the RCP8.5 Climate Change Scenarios
Kim <i>et al.</i>	2012	Geographical Migration of Winter Barley in the Korean Peninsula under the RCP8.5 Projected Climate Condition
Kwon <i>et al.</i>	2012	Geographical Shift in Blooming Date of Kiwifruits in Jeju Island by Global Warming
Kim <i>et al.</i>	2013	Outlook on Blooming Dates of Spring Flowers in the Korean Peninsula under the RCP8.5 Projected Climate

사량과 고도를 바탕으로 산악강수모형인 PRISM (Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model) 모형이 적용된다(Yun, 2010). 산출물은 기본적으로 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량의 월별 분포도인 일차기후도와, 이를 평균, 적산, 편차 등 통계한 이차기후도, 농식물의 생태 반응 분포를 지도화한 분석기후도로 구분된다(Yun, 2010).

성공적으로 개발된 평년 전자기후도를 바탕으로 시공간적으로 제작 영역이 확대되었다. 특히, 남한에 비해 관측 여건이 상대적으로 열악한 북한 지역을 대상으로 한 전자기후도가 제작되었다. 남한 지역에는 기상청이 운영하고 있는 종관기상관측소와 방재기상관측소, 추가로 여러 유관기관에서 설치하고 운영하고 있는 다수의 기상관측지점이 있으며, 해당 지점의 자료들이 고해상도의 전자기후도 제작 기반이 된다. 반면, 북한지역에는 2021년 현재 27개의 기상관측지점만이 운영되고 있기 때문에(<https://data.kma.go.kr>), 적은 수의 기상관측정보를 보정하기 위해 남한지역의 자료를 활용하여 평년 전자기후도 제작이 진행되었다. 기온의 경우 북한 관측지점의 기온자료를 단순 내삽한 후 고도값을 통한 기온감률 고도차보정 등을 통해 상세화가 진행되었으며, 일사량의 경우 남한의 위성기반 일사추정자료와 실측일사량 간의 선형관계식을 북한에 적용하는 방식을, 강수량의 경우 남한지역의 강수, 고도간의 관계를 회귀식으로 도출하고 이를 북한에 적용하는 방식으로 제작되었다(Kim and Yun, 2011a; Kim and Yun, 2011b; Kim and Yun, 2011c; Choi and Yun, 2011).

IPCC가 주기적으로 발간하고 있는 평가보고서 (Assesment Report; AR)에는 앞으로의 온실기체의 발생에 따른 기후변화 시나리오가 포함되며, 시나리오별로 기후변화가 여러 산업에 미칠 수 있는 영향과 이에 따른 정책 방향을 제시한다. 국내에서도 많은 분야에서 활용된 바 있는 시나리오로는 3차평가보고서(2001)의 SRES (Special Report on Emission Scenarios)와 5차평가보고서(2014)의 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오를 들 수 있다. 각각 미래에 전세계적으로 CO₂를 비롯한 온실가스의 감축 정도에 따른 기후전망정보를 담고 있으며, 이 중 일부를 국가 표준시나리오를 채택하여 정책 운영에 활용하고 있다. 국립기상연구소는 전지구 규모(해상도 135km)로 발표된 시나리오 정보를 활용하여 동아시아 규모(12.5km 해상도)와 남한 규모(1km 해상도)로 가공하여 제공하며

(KMA, 2008), 국내에서는 주로 이들 자료를 활용한 분석 연구가 수행되었다(Park *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2016; Cho *et al.*, 2018). 농촌진흥청 국립원예특작과학원은 이들 기상청 기후변화 전망자료를 농업분야에 이용하기 위하여 소기후모형을 적용한 평년 기후도 제작해상도와 동일한 30m 해상도의 고해상도 전망 자료로 재가공하여 제공하였다(<http://fruit.nihhs.go.kr/>). 이 자료는 미래의 농작물의 재배적지 변동에 활용되는 등(Kim *et al.*, 2012), 농업분야의 영향 평가나 정책수립에 활용되었다(Kim and Yun, 2008).

III. 소기후모형과 전자기후도의 확장: 농업기상재해 조기경보 서비스

선진국에서는 기후변화에 따른 재해위험을 미리 감지하고 이에 대처할 수 있는 시스템을 마련하기 시작했는데, 미국의 남동부 기후위험관리협력체제인 SECC (SouthEast Climate Consortium)이 구축한 AgroClimate가 대표적이다(<http://www.agroclimate.org>). AgroClimate는 농업분야 기상위험의 감소와 이에 따른 농가소득의 증대를 위해 기후전망에 근거한 정보를 제공하는 웹기반의 의사결정 시스템으로, 농가관련자들에게 장기예보, 기후전망 등의 예보 정보와 이에 근거한 동상해 위험, 가뭄 전망, 작황 전망, 생산 도일 등의 농업기상정보를 지도 형태로 제공한다(Fraisse *et al.*, 2006; Breuer *et al.*, 2008).

우리나라도 과거 전자기후도 기술을 통해 제작된 월별 기후도를 활용하여 과거와 현재, 미래 등 농업기후시대 구분 등에 활용하던 수준에서, 최근에는 기상실황 및 예보를 개별 필지수준으로 상세화하여, 이상기상과 그로 인한 농작물의 영향 예측을 사용자(농민)에게 직접 전달해주는 수준으로 정보의 질을 향상시키고 있다.

지나간 과거 기후자료의 경우 지점 단위의 관측된 기상정보를 배경기후도로 한다면, 기상실황 및 예보의 경우는 초단기 예보나 동네예보 등의 격자 자료가 이 배경기후도를 대체할 수 있다. 기존의 평년기후도의 제작기술, 즉 과거기간, 월 평균 기후에 소기후모형을 적용하는 방식과는 일정부분 차이가 있으며, 기온, 강수, 일사 등 기상요소별로 관련한 기술들이 연차별로 개발되어 오고 있다(Kim *et al.*, 2013; Kim and Yun, 2013; Kim and Yun, 2014; Kim and Yun, 2015; Kim and

Table 5. List of regions provided by the early warning system (2021)

Province	City
Chungcheongbuk-do	Goesan
Gyeongsangbuk-do	Uiseong
Gyeongsangnam-do	Hadong, Hamyang, Geochang, Sacheon, Sancheong, Uiryeong, Jinju, Hapcheon
Jeollabuk-do	Gochang, Gunsan, Gimje, Namwon, Muju, Buan, Sunchang, Wanju, Iksan, Imsil, Jangsu, Jinju, Jeongeup, Jinan
Jeollanam-do	Gokseong, Gwangyang, Gurye, Naju, Damyang, Boseong, Suncheon, Yeongam, Jangseong, Jangheung, Hampyeong, Hwasun, Gangjin, Muan, Yeonggwang, Haenam

Table 6. List of crops provided by the early warning system (2021)

Fruit trees	Vegetables crops	Food crops	Special crops
apple	garlic	barley	Bokbunja (Korean black raspberry)
blueberry	hot pepper	corn	citron
grape	kimchi cabbage	peanut	ginseng
Japanese apricot	Korean leek	potato	green tea
kiwi fruit	onion	red bean	mulberry
peach	radish	rice	Omija (<i>schisandra chinensis</i>)
pear	watermelon	sorghum	perilla
persimmon		soybean	rapeseed
plum		sweet potato	sesame

Table 7. List of papers related to the expansion of geospatial scheme of near-real time weather data

Author	Year	Title
Kim <i>et al.</i>	2013	Improving Usage of the Korea Meteorological Administration's Digital Forecasts in Agriculture: I. Correction for Local Temperature under the Inversion Condition
Kim and Yun	2013	Improving Usage of the Korea Meteorological Administration's Digital Forecasts in Agriculture: 2. Refining the Distribution of Precipitation Amount
Kim and Yun	2013	Distribution of Midday Air Temperature and the Solar Irradiance Over Sloping Surfaces under Cloudless Condition
Yun <i>et al.</i>	2013	User-specific Agrometeorological Service to Local Farming Community: A Case Study
Kim and Yun	2014	Improving usage of the Korea Meteorological Administration's Digital Forecasts in Agriculture: III. Correction for Advection Effect on Determination of Daily Maximum Temperature Over Sloped Surfaces
Yun	2014	Agrometeorological Early Warning System: A Service Infrastructure for Climate-Smart Agriculture
Kim and Yun	2015	Improving the Usage of the Korea Meteorological Administration's Digital Forecasts in Agriculture: IV. Estimation of Daily Sunshine Duration and Solar Radiation Based on 'Sky Condition' Product
Yun	2015	A Feasibility Study of a Field-specific Weather Service for Small-scale Farms in a Topographically Complex Watershed
Kim and Yun	2016	Feasibility of the Lapse Rate Prediction at an Hourly Time Interval
Kim and Yun	2016	Improving the Usage of the Korea Meteorological Administration's Digital Forecasts in Agriculture: V. Field Validation of the Sky-condition based Lapse Rate Estimation Scheme

Table 7. Continued

Author	Year	Title
Kim and Yun	2016	Downscaling of Sunshine Duration for a Complex Terrain Based on the Shaded Relief Image and the Sky Condition
Park <i>et al.</i>	2017	Speed-up Techniques for High-Resolution Grid Data Processing in the Early Warning System for Agrometeorological Disaster
Shin <i>et al.</i>	2017	Design and Implementation of Mobile Application for Field-specific Early Warning of Agrometeorological Hazards
Kim	2017	Estimation of Temporal Surface Air Temperature under Nocturnal Inversion Conditions
Yun and Kim	2019	Improving Usage of the Korea Meteorological Administration’s Digital Forecasts in Agriculture: Correction Method for Daytime Hourly Air Temperature over Complex Terrain
Yun and Kim	2018	Estimation of hourly daytime air temperature on slope in complex terrain corrected by hourly solar radiation
Kim <i>et al.</i>	2020	A System Displaying Real-time Meteorological Data Obtained from the Automated Observation Network for Verifying the Early Warning System for Agrometeorological Hazard
Kim <i>et al.</i>	2020	An Analysis of Water Vapor Pressure to Simulate the Relative Humidity in Rural and Mountainous Regions

Yun, 2016). 상세화된 기상실황 및 예보 자료는 일 단위, 나아가 시간 단위의 대민 서비스의 개념으로 높은 수준의 정확도를 요구한다. 특히 재해위험 판정 등에 영향을 미칠 수 있는 기상요소는 그 추정오차를 줄이기 위한 노력을 계속해오고 있으며, 레이더자료, 위성자료 등과 같이 활용되는 배경 자료 또한 늘어가고 있다. 기상청에서 발표하는 초단기 예보(KLAPS; Korea Local Analysis and Prediction System)는 사방 5km격자료 제공되고 있는데, 조기경보서비스에서는 이를 활용하여 더욱 상세화된 고해상도 분포도로 제작하여 복잡지형에서의 검증오차(RMSE) 기준으로 더욱 유용한 것으로 평가받았다(Kim *et al.*, 2013; Kim and Yun, 2013; Kim and Yun, 2014; Kim and Yun, 2015; Kim and Yun, 2016).

농촌진흥청은 2014년부터 국립농업과학원과 국가농림기상센터, 주식회사 에피넷, 전라북도 농업기술원 등의 기관과 함께 농업기상재해 조기경보 서비스 구축 시범 사업으로 발전시켜 진행해오고 있다(Yun, 2014). 섬진강 유역의 3개 표준유역을 시범 지역으로 시작하여 사업은 2021년 현재, 전라도, 경상도, 충청도 일부 지역까지 총 40여개 시군단위로 확대되었으며, 연차별로 서비스 대상시군을 늘려가고 있다(Table 5).

농업기상재해 조기경보 서비스는 기상청에서 발표하는 실황 및 예보자료를 바탕으로 일별 최고 및 최저 기온, 강수량 등 다양한 날씨 정보를 농장단위로 상세화하여 제공하고 있으며, 이렇게 상세화된 기상정보를

바탕으로 36개 작목(과수, 식량, 채소 등, 2021년 기준)의 생육진행 정도와 발생 가능한 기상재해를 대응지침과 함께 조기에 제공함으로써 재해 대응에 도움을 주고 있다(Table 6) (<http://www.agmet.kr>).

IV. 소기후모형과 전자기후도의 미래

국토의 상당부분이 산지로 이루어져 있는 우리나라의 농림업 환경은 기상이나 기후분포의 변이가 크다. 이러한 환경적인 요건에서 소기후모형은 과거부터 활용가치가 지속적으로 커지고 있다. 그리고, 소기후모형을 활용하여 다양한 주제로 제작되고 있는 전자기후도는 과거, 현재, 미래, 그리고 실황 및 예보까지, 다양한 시공간적인 해상도를 바탕으로 개발 및 개선되고 확장되어 농림업 분야에 다양하게 활용되고 있다.

국내 기상관측 여건이 점진적으로 개선되는 것과는 별개로 미래에도 임의 지역의 일정한 규모의 기상/기후 면적 단위 추정 기술은 필요하다. 이에 따른 기술개발이 지속적으로 이루어질 것이며, 과거와 현재, 그리고 미래의 농림 기상 분야의 영향평가에 앞으로도 다양하게 활용될 것으로 기대한다. 새로운 평년 계산 주기인 1991-2020 기간에 대한 기후도를 바탕으로 진행될 다양한 농림업 영향평가는 기존에 제작한 과거 평년 단위인 1971-2000, 1981-2010기간과의 시공간적인 비교를 통해 지구온난화의 영향 등의 해석에 활용될 수 있다.

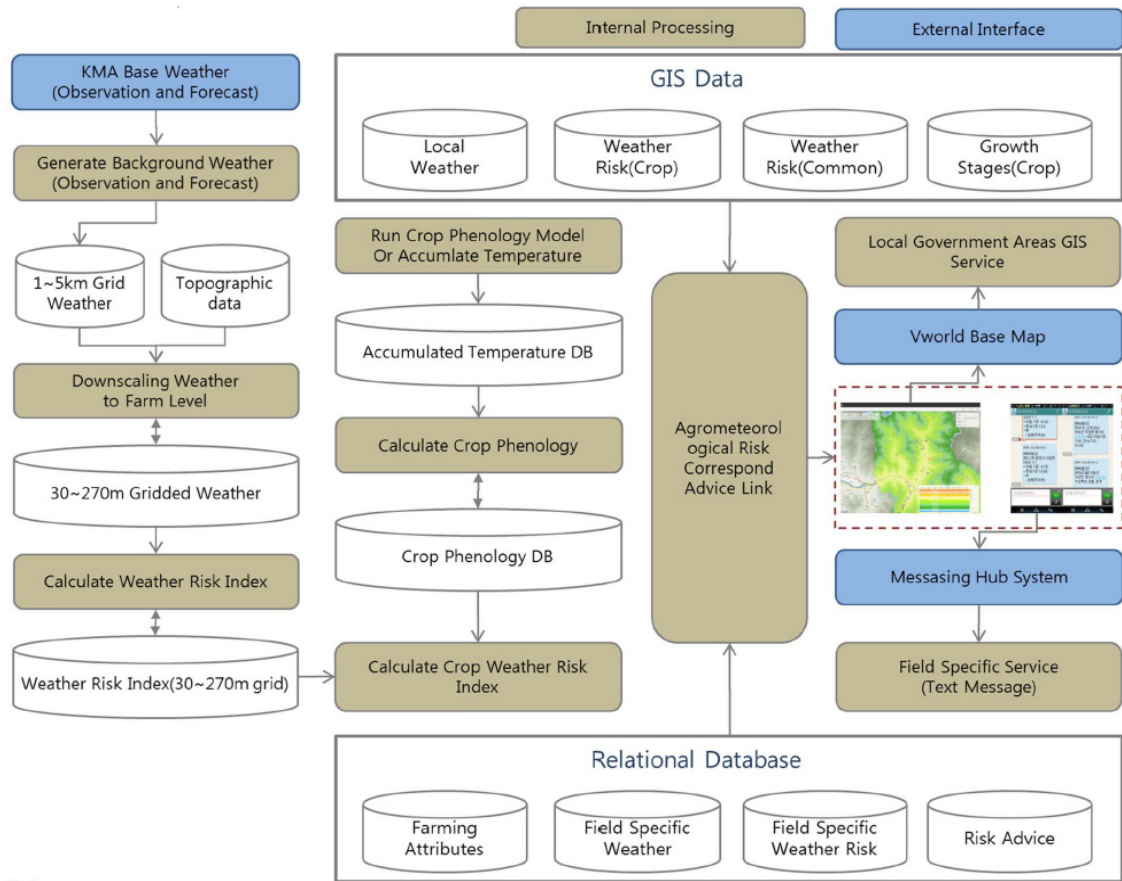


Fig. 3. Flow chart of agrometeorological early warning system presented by Shin *et al.*(2015)

한편, IPCC는 2020년 6차 평가보고서를 통해 새로운 기후변화시나리오인 SSP (Shared Socioeconomic Pathways)를 발표하였다(IPCC, 2021). 공통사회 경제 경로라고도 일컬어지는 이 기후변화 시나리오는 기존 RCP 시나리오의 개념인 복사강제력 강도에 미래 사회 경제의 변화를 더하여 앞으로의 완화와 적응 노력에 따라 5개의 시나리오로 구별하고 있다. 시나리오 별로 복사강제력은 2.6, 4.5, 8.5 W/m²이 적용되며, 사회경제 지표는 1에서 5까지 기준에 따라 구분하고 있는데, 2100년을 기준으로 SSP5-8.5 시나리오는 기존 RCP 8.5에 비해 CO₂ 배출량이 높으며, SSP1-2.6 시나리오는 기존 RCP2.6 시나리오와 비슷한 수준으로 예상하고 있다(Fig. 4) (<http://www.climate.go.kr/>; O'Neill *et al.*, 2014). 새로운 시나리오에 따라 농작물의 재배적지 환경의 변화 정도 또한 기존 연구와는 달라질 것으로 예상되며, 기존의 한반도에서 재배되지 않던 농작물이 새롭게 재배될 수도, 반대로 현재 활발하게 재배

되고 있는 농작물이 더 이상 재배되지 못할 수도 있을 것이다. 최근 갱신된 평년에 대한 기후도와 새로운 미래 기후 시나리오를 바탕으로 고해상도의 농림업용 미

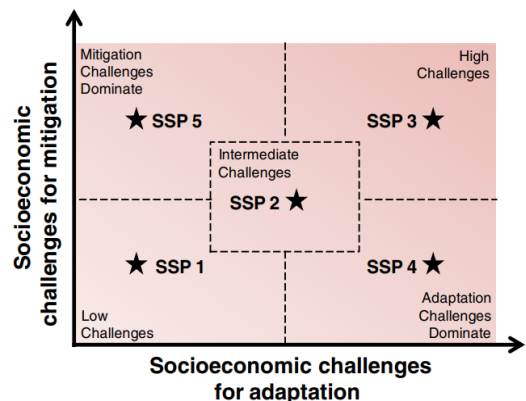


Fig. 4. Configuration and content of SSP scenario presented by O'Neill *et al.*(2014)

래 기후 예상 분포도를 제작하고 기후 변화 추세 예상을 통한 농업기후지수 등의 영향 평가 등이 진행될 수 있다. 기존 시나리오와 더불어 다양한 시나리오별로 발생할 수 있는 농작물의 재배환경변화에 대한 폭넓은 분석이 필요한 시점이다.

또한, 농장 필지 단위로 기상 실황 및 예보를 통한 작물별 생육진행도와 발생 가능한 재해를 미리 개별 농가에게 전달해주는 농업기상재해 조기경보 서비스 시스템은 세계에서 찾아보기 어려운 우리나라의 독창적인 기술로 지속적으로 발전하기를 기대한다. 지형이 복잡하고, 소규모 농장이 많은 우리나라 농업 환경에서는 상세화 된 날씨 정보를 통해 세밀하고 차별화된 재해 정보를 제공할 수 있으며, 이는 “내 농장에서 재배하고 있는 농작물의 생육정도와 재해 예측정보”의 제공을 가능하게 한다. UN 재해경감사무국(UNDRR; United Nation International Strategy For Disaster Reduction)은 국제적으로 재해를 경감시키기 위한 체제와 목표(framework)를 발표하고 있다. 2005년 발표된 효고 프레임워크(Hyogo Framework 2005-2015)에서는 기존의 피해복구에 국한되던 재해 관리의 기준을 사전에 예측하고 대비할 수 있는 위험 관리로의 전환을 추진하였는데(Wilhite *et al.*, 2000), 그 중심에 조기경보 체계 구축이 포함된다(Tang and Zou, 2009). 이어진 2015년 센다이 프레임워크(Sendai Framework, 2015- 2030)는 지속가능하고 증가시켜야 할 목표(Global Targets) 중 하나로 재해 조기경보 체계의 확대를 포함하였다(Pearson and Pelling, 2015). 이에 발맞춰 우리나라에서도 농업기상재해 조기경보 서비스는 광역단위로 점차 확대되어 2027년 전국을 대상으로 서비스 구축을 목표로 하고 있다. 나아가 미래 통일한국시대에는 더 넓은 지역으로의 확대를 기대할 수 있겠다.

전국 어디에나 적용할 수 있는 표준화된 상세화 기술을 바탕으로 지역 확대가 되겠으나, 단순한 대상 지역의 확대로 머무는 것이 아닌, 소기후모형의 특성상 지속적인 신뢰도 검증에 따른 기후시대별, 또는 환경별 모형의 개선이 지속적으로 진행되어야 할 것이다. 현재와 다가오는 미래에는 빅데이터 시대를 맞이하여 빠르게 발전하고 있는 인공지능 기술과 데이터처리 기술을 기반으로 다양한 분야에서 새로운 지식들이 창출되고 있다. 조기경보시스템 또한 복잡한 농림생태계의 이해를 위해 빅데이터의 활용을 피할 수 있을 것이다. 과거 실험포장 등에서 진행되어왔던 내동성, 내풍성

실험 등을 통해 찾아낸 작물들의 기상 적응 임계 조건은 다양한 변수들이 존재하는 실제 농장 환경에 적용하기에 적합하지 않을 수 있다. 다수의 일반인, 또는 연구자들이 수집하고 공개하고 있는 다양한 정보들, 이를테면, 실제 재해가 발생했던 지역, 작물, 해당 환경 조건 등을 정리하고, 이를 데이터화 하여 활용한다면, 보다 현실에 맞는 재해정보를 생산할 수 있을 것이다.

앞으로도 진보된 소기후모형과 이를 적용한 전자기후도를 통해, 4차산업시대 선진국 수준의 디지털 농림업사회의 기반이 될 수 있는 기상/기후의 정보를 생산하고, 이를 활용한 농림업 분야의 질적 발전에 하나의 큰 축으로의 성장할 것을 기대한다.

적 요

지형기후학을 기반으로 한 소기후모형은 전자기후도를 제작하기 위해 개발되었고 농림업 현장의 농장 단위로 적용이 가능한 고해상도 규모로 발전하였다. 본 총설에서는 이러한 소기후모형의 미래 발전방향을 제시하고자, 그동안의 개발 및 발전과정을 다시 조망하였다. 우리나라 농산촌의 특징은 지형이 복잡 다양하며, 소규모로 구성되어 있어 기상과 기후의 공간적인 변이가 크다. 식물의 생육을 지배하는 농림기후는 공간 규모에서 소기후로 분류되어, 중규모인 기상청 종관기상관측(ASOS) 정보만으로는 활용이 제한된다. 이에 농림업에서 활용 가능한 기후정보를 효과적으로 모의하기 위해 소기후모형이 개발되고 발전되어 왔다. 작은 집수역을 대상으로 연구된 전자기후도는 전산처리 기술의 발전과 더불어 전국 범위의 고해상도 분포도 제작이 가능하게 되었으며, 과거 평년뿐 아니라, 미래 기후변화 시나리오, 나아가 실황과 예보자료를 실시간으로 처리하는 데 이르렀다. 최종적으로 상세화된 기상예보를 바탕으로 농장 단위로 재배작물의 생육 진행과 재해예보를 제공할 수 있는 농업기상재해 조기경보서비스로 완성되었다. 기후위기 시대에 재해로 인한 피해를 경감하기 위해 세계적으로 조기경보시스템의 확대를 추진하고 있는 바, 진보된 소기후모형을 적용한 농업기상재해 조기경보서비스는 기술발전을 통해 적용대상 지역을 확대해 나아가야 할 것이다. 조기경보서비스가 디지털 기반의 지속가능한 농림생태사회시스템에 기여하는 핵심 기술이 되기 위해서는, 실측 기반의 다양한 검보정 자료가 구축되어 적용되어야 하며, 사용자들과 농림업 현장의 목소리를 반영하여

지속가능발전의 패러다임을 담아내는 유기적인 플랫폼이 되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ014879042021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Breuer, N. E., V. E. Cabrera, K. T. Ingram, K. Broad, and P. E. Hildebrand, 2008: AgClimate: a case study in participatory decision support system development. *Climatic Change* **87**, 385-403.
- Choi, M.-H., and J. I. Yun, 2011: A sub-grid scale estimation of solar irradiance in North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(1), 41-46. (in Korean with English abstract)
- Cho, J., I. Jung, W. Cho, and S. Hwang, 2018: User-centered climate change scenarios technique development and application of Korean peninsula. *Journal of Climate Change Research* **9**(1), 13-29. (in Korean with English abstract)
- Daly, C., R. P. Neilson, and D. L. Phillips, 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* **33**(2), 140-158.
- Fraisse, C. W., N. E. Breuer, D. Zierden, J. G. Bellow, J. Paz, V. E. Cabrera, A. Garcia y Garcia, K. T. Ingram, U. Hatch, G. Hoogenboom, J. W. Jones, and J. J. O'Brien, 2006: AgClimate: A climate forecast information system for agricultural risk management in the southeastern USA. *Computers and Electronics in Agriculture* **53**(1), 13-27.
- Hungerford, R. D., R. R. Nemani, S. W. Running, and J. C. Coughlan, 1989: MTCLIM: A mountain microclimate extrapolation model. *USDA Forest Service. Research Paper INT-414*, 52pp.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge university Press.
- Kim, D.-J., J.-H. Kim, J.-H. Roh, and J. I. Yun, 2012: Geographical migration of winter barley in the Korean peninsula under the RCP8.5 projected climate condition. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(4), 161-169. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-J., and J. I. Yun, 2011a: Estimation of monthly precipitation in North Korea using PRISM and digital elevation model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(1), 35-40. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-J., and J. I. Yun, 2013: Improving usage of the Korea Meteorological Administration's digital forecasts in agriculture: 2. Refining the distribution of precipitation amount. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(3), 171-177. (in Korean with English abstract)
- Kim, D. J., S. O. Kim, J. H. Kim, and E. J. Yun, 2019: Establishment of geospatial schemes based on topo-climatology for farm-specific agrometeorological information. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(3), 146-157. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.-H., and J. I. Yun, 2008: On mapping growing degree days (GDD) from monthly digital climatic surfaces for South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 1-8. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.-H., and J. I. Yun, 2011b: Zoning hydrologic units for geospatial climatology in North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(1), 20-27. (in Korean with English abstract)
- Kim, S. O., D. J. Kim, J. H. Kim, and J. I. Yun, 2013: Improving usage of the Korea Meteorological Administration's digital forecasts in agriculture: I. Correction for local temperature under the inversion condition. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(2), 76-84. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.-O., and J. I. Yun, 2011c: Mapping monthly temperature normals across North Korea at a landscape scale. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(1), 28-34. (in Korean with English abstract)
- Kim, S. O., and J. I. Yun, 2014: Improving usage of the Korea Meteorological Administration's digital forecasts in agriculture: III. Correction for advection effect on determination of daily

- maximum temperature over sloped surfaces. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(4), 297-303. (in Korean with English abstract)
- Kim, S. O., and J. I. Yun, 2015: Improving the usage of the Korea Meteorological Administration's digital forecasts in agriculture: IV. Estimation of daily sunshine duration and solar radiation based on 'Sky Condition' product. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(4), 281-289. (in Korean with English abstract)
- Kim, S. O., and J. I. Yun, 2016: Improving the usage of the Korea Meteorological Administration's digital forecasts in agriculture: V. Field validation of the sky-condition based lapse rate estimation scheme. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(3), 135-142. (in Korean with English abstract)
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2008: *Understanding Climate Change and Application Climate Change Scenarios [I]*. 15-20. (in Korean)
- Lim, Y. J., S. Kim, D. H. Jang, J. Park, Y. H. Kim, B. J. Kim, and M. K. Kim, 2016: Analysis of the high-resolution future wind resource based on RCP scenarios. *Journal of Climate Research* **11**(1), 29-47. (in Korean with English abstract)
- NIMS (National Institute of Meteorological Sciences), 1992: *Estimation of 1x1 km Mesh Climatic Value over the Whole Country and Its Application to Agriculture(III)*, Ministry of Science and Technology.
- Okamura, T., 1987: Mesh climatic data-present and prospect of production and application. *Tenki* **34**(3), 25-42. (in Japanese)
- O'Neill, B. C., E. Kriegler, K. Riahi, K. L. Edi, S. Hallegatte, T. R. Carter, R. Mathur, and P. van Vuuren, 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* **122**, 387-400.
- Park, M., M. Park, and J. Yoon, 2013: Assessment of rainfall simulated on RCP scenarios for disaster management. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* **13**(5), 195-202. (in Korean with English abstract)
- Park, M., H. J. Sim, Y. Park, and S. Kim, 2015: Drought severity - duration - frequency analysis based on KMA 1-km resolution RCP scenario. *Journal of Disaster Management* **15**(3), 347-355. (in Korean with English abstract)
- Pearson, L., and M. Pelling, 2015: The UN Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030: negotiation process and prospects for science and practice. *Journal of Extreme Events* **2**(1), 157001.
- Regniere, J., D. Lavigne, R. Dichison, and A. Staples, 1995: *Performance Analysis of BioSIM, a Seasonal Pest Management Planning Tool*, In Brunswick in 1992 and 1993. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service Info. Rep. LAU-X-115. 28pp.
- Shin, Y. S., J. H. Park, S. K. Kim, W. S. Kang, K. M. Shim, and E. W. Park, 2015: An operational site-specific early warning of weather hazards for farmers and extension workers in a mountainous watershed. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(4), 290-305. (in Korean with English abstract)
- Tang, X., and Y. Zou, 2009: Overview of Shanghai MHEWS and the role of NMHS. *Second Experts' Symposium on MHEWSs with Focus on the Role of NMHSs*, 5-7 May 2009, Toulouse, France. (Available at <http://www.wmo.int/pages/prog/drr/events/MHEWS-IIPresentations/Session%201/Shanghai/ShanghaiMHEWS.pdf> 34)
- Wilhite, D. A., M. J. Hayes, C. Knutson, and K. H. Smith, 2000: Planning for drought: moving from crisis to risk management. *Journal of American Water Resources Association* **36**, 697-710.
- Yun, J. I., 2004: Visualization of local climates based on geospatial climatology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 272-289. (in Korean with English abstract)
- Yun, J. I., 2007: Application of "high definition digital climate maps" in restructuring of Korean Agriculture. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**(1), 1-16. (in Korean with English abstract)
- Yun, J. I., 2010: Agroclimatic maps augmented by a GIS technology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**(1), 63-73. (in Korean with English abstract)
- Yun, J. I., 2014: Agrometeorological early warning system: a service infrastructure for climate-smart agriculture. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(4), 403-417. (in Korean with English abstract)
- Yun, J. I., K. B. Yoo, M. Y. Lee and K. W. Chung, 1989: Analysis of agricultural climatology in Cheju island I. Distribution of daily minimum temperature in winter season estimated from a topoclimatological method. *Korean Journal of Crop Science* **34**(3), 261-269. (in Korean with English abstract)